

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14188

研究課題名（和文）動的スパースモデリング理論によるネットワーク系の最適ノードスケジューリング

研究課題名（英文）Optimal node scheduling of network systems using dynamic sparse modeling

研究代表者

池田 卓矢（Ikeda, Takuya）

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：00848319

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：スパース性制約下における可制御性グラミアンの最大化問題について、その最適解の数理的性質の解明と高効率な数値解法の提案を行った。まず、可制御性リアプノフ微分方程式を用いた可制御性グラミアンの表現方法を利用し、本問題がある最適制御問題として等価に表現可能であることを示した。そして、これに最大原理を適用することで、最適解の必要条件を導出した。この性質にもとづき、本問題が凸最適化問題と等価となる条件を導出した。次に、可到達集合に外接する平行体を特徴付け、これを介して近似指標の定量化を行った。本手法を用いた近似解法では、凸緩和手法による解法と比較すると解の品質は劣るが、計算量的負荷が少ない長所がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で考察する動的スパースモデリングは理論的に新しいだけでなく、省エネルギーと通信制約を同時に最適化に取り入れた制御理論として学術的意義がある。また、本研究の応用範囲には無人航空機により構成されるマルチエージェントシステムの制御が含まれ、農業における農薬散布や航空写真の撮影等の産業的な応用のほか、巨大地震や広域火災などによる災害調査や探索などの急務かつ重要な応用がある。そのほか、ネットワークを内部に有する大規模系の設計理論は、制御理論分野のみならず情報工学や脳神経科学等の多岐にわたる分野に応用があり、その理論の確立により先端技術の発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have studied an optimization problem of maximizing controllability Gramians under sparsity constraints, elucidating the mathematical characteristics of the optimal solution and proposing effective numerical algorithms. First, we have shown that this problem can be equivalently expressed as a certain optimal control problem from the controllability Lyapunov differential equation. By applying the maximum principle to this optimal control problem, we have derived a set of necessary conditions for an optimal solution. Based on this property, we have derived a sufficient condition under which this problem is equivalent to a convex optimization problem. Second, we have characterized the parallelepiped that is tangent to the reachable set, from which we have derived a linear approximation of the cost function. Although the approximate solution using this method is inferior to the solution of the convex relaxation method, it has the advantage of being computationally less demanding.

研究分野：制御理論

キーワード：スパース制御 最適制御 ネットワークシステム ノード選択 可制御性 凸最適化 マルチエージェントシステム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、無線通信を利用したセンサーネットワークやドローン群の飛行制御など、ネットワークを介した制御システムに関する研究が活発に行われている。こうした系では、規模が大きくなるにつれて、制御に必要なデータ通信量や通信路数などに制限が発生する。そのため、このようなスパース性に関する制約を考慮した最適なネットワークの接続構造を見つけることは、この分野における重要な課題の一つとされている。これらの問題は一般的に組合せ最適化問題として表現されるため、工夫なく計算することは現実的ではなく、最適化問題の性質を活用した効率的な数値解法が必要とされる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ネットワークを有する大規模系のための動的スパースモデリング理論を構築し、省エネルギーの観点から高効率なノードスケジューリング手法を設計することである。本研究では、これまでの予備研究で得られた動的スパースモデリングの理論的成果をネットワーク系の最適制御へと拡張し、そのための高速計算法を導出する。

3. 研究の方法

本研究では、上記の背景と目的に基づき、以下の課題に取り組んだ。

- (1) 可制御性能に注目した最適ノードスケジューリング手法の理論的解析
- (2) 可到達集合の平行体近似を用いた高速アルゴリズムの開発

4. 研究成果

本研究成果は大きく三つに分かれる。

(1) 可制御性能に注目した最適ノードスケジューリング手法の理論的解析

スパース性制約下における可制御性グラミアンの最大化問題について取り組み、その最適解の数学的性質の解明や高効率な数値解法の提案を行った。より具体的には、可制御性リアプノフ微分方程式を用いた可制御性グラミアンの表現方法を利用し、本問題がある最適制御問題として等価に表現可能であることを示した。そして、これに最適制御分野の数学的道具である最大原理を適用することで、最適解の必要条件を導出した。この性質にもとづき、本問題が凸最適化問題と等価となる条件を導出した。

(2) 可到達集合の平行体近似を用いた高速アルゴリズムの開発

可到達集合とは、単位量の制御入力により原点から到達可能な状態からなる集合を言い、制御の難易度を定量化する際に有益な性質を持つ。本研究では、これに外接する平行体を特徴付け、これを介して近似指標の定量化を行った。本手法を用いた近似解法では、必ずしも元の問題の最適解を導出するとは限らないため、上記4.(1)の凸緩和手法による解法と比較すると解の品質は劣るが、計算量的負荷が少ない長所がある。解の精度と計算時間に関する例を、以下の図1に示す。(なお、図は「池田, ネットワークトポロジーの最適設計, システム/制御/情報, 第68巻, 第6号」より引用した。) 近似解法の性質として、評価値の劣化を抑えつつ、計算時間を大幅に削減することが確認できる。

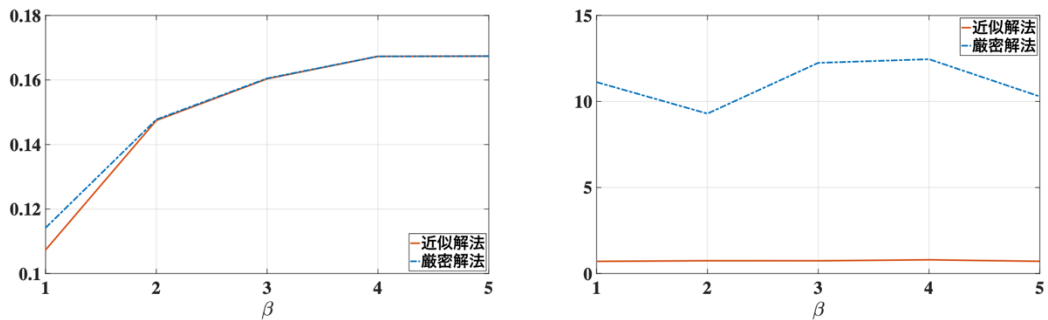


図1. 近似解法と厳密解法の比較.

左の図は最適解に対応する可制御性グラミアンの最小固有値を、右の図は計算時間をそれぞれ表す。

(3) 本手法に関連するその他の成果

- ① ネットワーク系の制御問題に関連して、自律分散制御やデータ駆動制御に取り組んだ。エージェントの視野角制約に対応可能なフォーメーション制御則を記述し、またノード間の接続構造等が未知であっても制御の最適性を保証可能な観測データに基づく制御手法を与えた。
- ② ガウシアングラフィカルモデルの考え方を援用し、合意ネットワーク系におけるノード間の接続構造を推定する最適化手法を与えた。ここでは、合意系が持つグラフラプラシアン固有ベクトルの性質などを考慮することで、尤度関数を辺の重みに関して陽に記述した。既存の疎構造学習手法と比較し、提案手法では、接続構造だけでなく辺の重みまでを精度良く推定できる。
- ③ 凸緩和手法に基づいたスパース最適化手法では、元の問題の最適解を常に与えるわけではなく、最適解の等価性が成り立つためには系のモデルに関していくつかの仮定が必要となる。この課題の解決に向けて、非凸なスパース罰則項を採用した最適化手法へと調査対象を拡大して解析を行なった。そして、特に線型システムに対するスパース最適制御問題については、最適解が元の問題の最適解と一致する非凸なスパース最適制御問題のクラスを理論的に導出した。また、ネットワーク系の疎構造学習問題においても、非凸なスパース罰則項を用いることで従来の凸緩和手法と比較して高精度な推定解が得られることを示した。

以上の成果は、Automatica や IFAC World Congress などの、制御分野における主要な学術雑誌や国際会議にて採録された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ikeda Takuya, Kashima Kenji	4. 巻 9
2. 論文標題 Sparse Control Node Scheduling in Networked Systems Based on Approximate Controllability Metrics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 1166 ~ 1177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCNS.2022.3154666	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ikeda Takuya, Sakurama Kazunori, Kashima Kenji	4. 巻 67
2. 論文標題 Multiple Sparsity Constrained Control Node Scheduling With Application to Rebalancing of Mobility Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 4314 ~ 4321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2021.3115441	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ikeda Takuya, Nagahara Masaaki	4. 巻 135
2. 論文標題 Resource-aware time-optimal control with multiple sparsity measures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109957 ~ 109957
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2021.109957	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ikeda Takuya, Nagahara Masaaki, Chatterjee Debasish, Srikant Sukumar	4. 巻 6
2. 論文標題 Constrained Smoothing Splines by Optimal Control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 1298 ~ 1303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2021.3092638	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ikeda Takuya, Nagahara Masaaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Maximum Hands-Off Control With Time-Space Sparsity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 1213 ~ 1218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2020.3023265	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikeda Takuya, Ohtsuka Tomofumi, Kashima Kenji	4. 巻 164
2. 論文標題 Matrix Pontryagin principle approach to controllability metrics maximization under sparsity constraints	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 111655 ~ 111655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2024.111655	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuzaki Fumiya, Ikeda Takuya	4. 巻 -
2. 論文標題 Sparse Topology Estimation for Consensus Network Systems via Minimax Concave Penalty	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2024.3407630	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 池田卓矢	4. 巻 68
2. 論文標題 ネットワークポロジの最適設計	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 システム制御情報学会誌	6. 最初と最後の頁 212-217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Takuya Ikeda, Kenji Kashima
2. 発表標題 Sparse network identification for consensus discrete-time systems
3. 学会等名 IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomofumi Ohtsuka, Takuya Ikeda, Kenji Kashima
2. 発表標題 On numerical solution to sparsity constrained controllability metrics maximization
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomofumi Ohtsuka, Takuya Ikeda, Kenji Kashima
2. 発表標題 Matrix Pontryagin principle approach to controllability metrics maximization under sparsity constraints
3. 学会等名 International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Ikeda, Masaaki Nagahara
2. 発表標題 Resource-aware time-optimal control with multiple sparsity measures
3. 学会等名 IFAC Symposium on Robust Control Design (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大塚智文, 池田卓矢, 加嶋健司
2. 発表標題 スパース性制約付き可制御性最大化問題の可制御性リアプノフ微分方程式に基づく解法
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Ikeda, Kenji Kashima
2. 発表標題 Optimal time-varying topology for network systems
3. 学会等名 13th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumiya Matsuzaki, Takuya Ikeda
2. 発表標題 Distributed formation control for discrete-time systems with field of view constraint
3. 学会等名 13th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shota Nomasa, Takuya Ikeda
2. 発表標題 Data-driven optimal control for discrete-time linear systems
3. 学会等名 13th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田俊平, 池田卓矢, 櫻間一徳, 加嶋健司
2. 発表標題 スタッフの移動ダイナミクスを考慮したワンウェイ型カーシェアリングサービスにおけるスパースリバランシング
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永原正章, 池田卓矢
2. 発表標題 最適制御による平滑化スプライン
3. 学会等名 第36回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumiya Matsuzaki, Rio Yotsumoto, Takuya Ikeda
2. 発表標題 Sparse structure learning for consensus network systems via sum-of-absolute-values regularization
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------